

A HALL-EFFEKTUS DEMONSTRÁLÁSA

DR. PATKÓ GYÖRGY *főiskolai docens*

(Közlésre érkezett: 1974. december 11.)

A Hall-effektus a matematika—fizika szakos általános iskolai tanárképzésnek előírt tananyaga. Már ezért is fontos a demonstrálása. A szilárdtestfizika alaptörvényeinek megismerése céljából az effektus laboratóriumi mérőgyakorlatának beállítása is indokolt, ugyanis technikai alkalmazása valóságos iparággá fejlődött ki.

A jelenség rövid leírása és jellemzése

Ha egy téglalap alakú vezető vagy félvezető hosszúságában az elektromos áramerősség I_y és a B indukcióvektor merőleges a mellső lapra, akkor az oldallapok között az \bar{I}_y áram és a \bar{B} mágneses indukcióvektor irányára merőlegesen \bar{E}_y elektromos tér, és ennek következtében U_{II} potenciálkülönbség keletkezik. Ezt a potenciálkülönbséget *Hall-feszültségnek*, a jelenséget pedig *Hall-effektusnak* nevezzük.

A leírt jelenségnél v_x sebességgel mozgó elektronok a *Lorentz-erő* hatására eltérülnek (1. ábra). Ezért a 2. oldallapon pozitív, az 1. oldallapon negatív töltések halmozódnak fel. Az E_y elektromos tér erőssége:

$$\bar{E}_y = \bar{v}_x \times \bar{B}. \quad (1)$$

A jelenség a klasszikus elektronelmélettel értelmezhető [8]. 289. o. Itt nem közölt számítás szerint:

$$U_{II} = R_{II} \cdot \frac{B \cdot I_y}{d}, \quad (2)$$

ahol:

U_{II} — a Hall-feszültség;

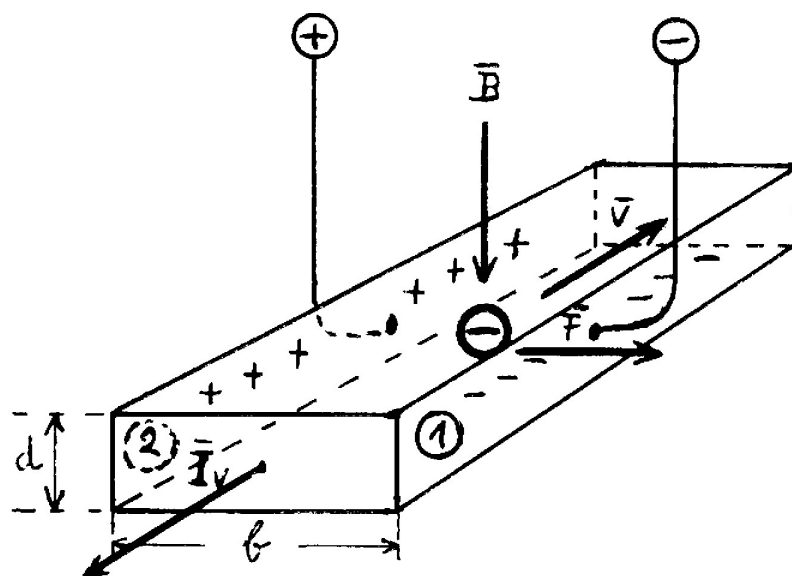
d — a minta lineáris mérete a B vektor irányában;

R_{II} — a Hall-állandó.

A klasszikus elmélet alapján az elektronvezető anyagok Hall-állandója mindig negatív:

$$R_{II} = \frac{n \cdot e}{A}, \quad (3)$$

ahol: n — a térfogategységben levő töltések száma, e — elektron töl-

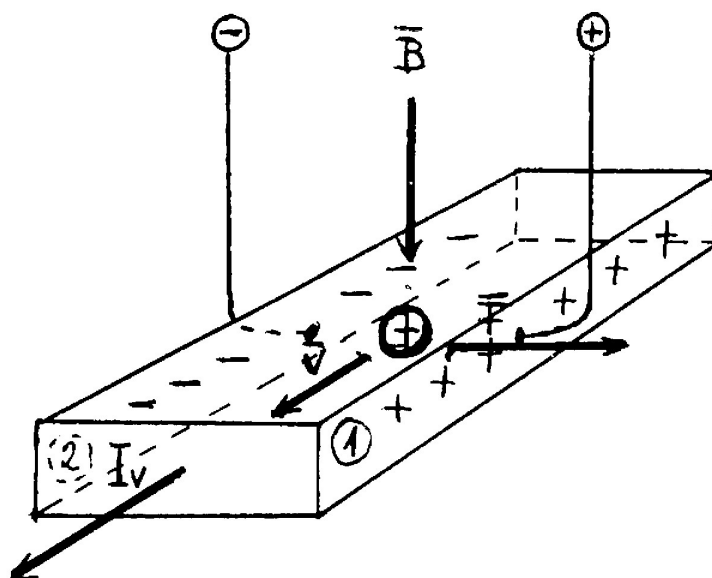


1. ábra: A Hall-effektus alapelve, elektronvezetés esetében

tése. A mérések eredményeiből kiderül, hogy sok vezetőmintát Hall-állandója negatív és nagyságrendje megegyezik a számított értékekkel.

Vannak azonban kivételek. Néhány vezetőknek, mint például Fe, Co, Zn, Cd, Pb Hall-állandója pozitív. A szilárdtestfizika kvantumelméletéből következik, hogy speciális vezetőkben az e töltés úgy mozog, mintha az elektronnal ellentétes előjelű volna [1]. 29. o. A pozitív Hall-állandó elmélete megfelel *Dirac* azon felismerésének, hogy az antirészecskéket is mint „lyukakat” lehet értelmezni a negatív energiájú részecskék terében (2. ábra).

Az n-típusú (elektronvezető) és p-típusú (lyukvezető) félvezetők Hall-állandója nemcsak a két fajta (n, p) töltéshordozó mozgékonyaságából (n_e ,



2. ábra: A Hall-effektus alapelve „lyukvezetés” esetében

n_p) és a térfogategységben levő töltések számából függ, hanem a B mágneses indukció nagyságától is [5]. 463. o.

Gyenge térben a Hall-állandó:

$$R_H = \frac{A}{q} \cdot \frac{u_p^2 \cdot n_p - u_e^2 \cdot n_e}{(u_p \cdot n_p + u_e \cdot n_e)^2}, \quad (4)$$

ahol:

A — dimenzió nélküli együttható;

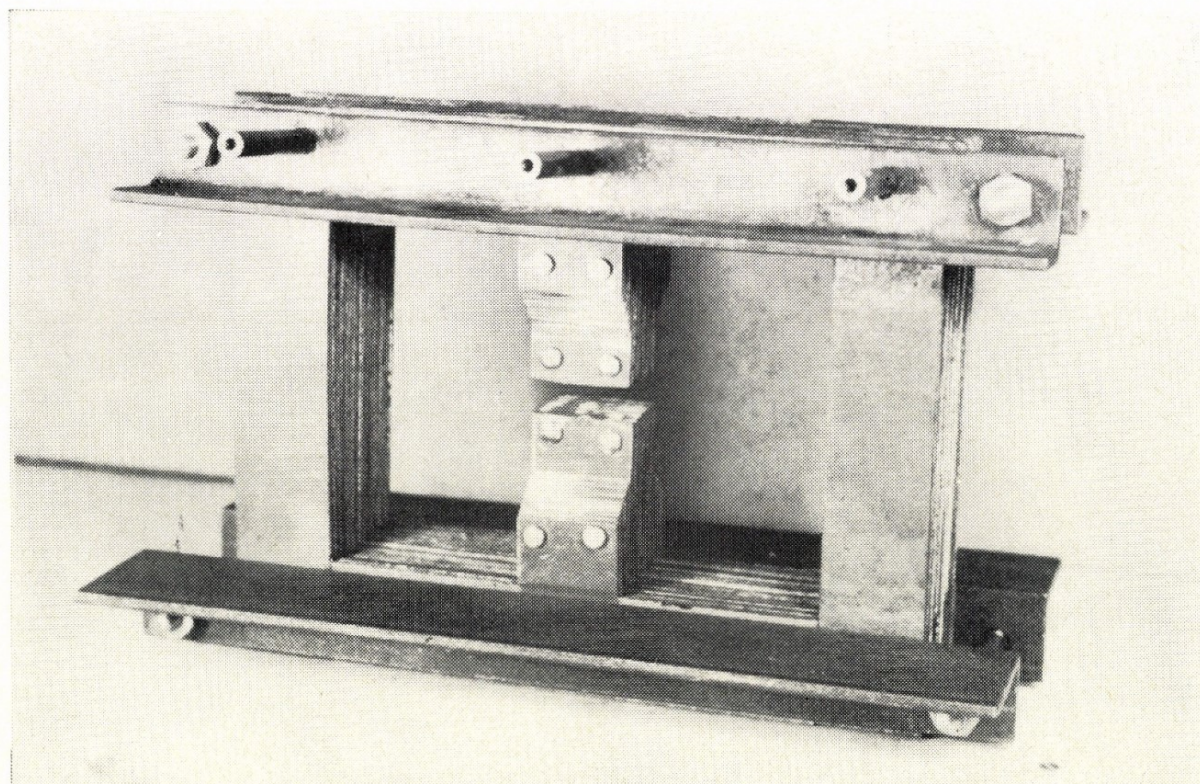
q — áramhordozó töltések.

A félvezető elsődleges vezetési típusát az R_H Hall-állandó előjeléből meg lehet határozni.

A Hall-effektus demonstrálása

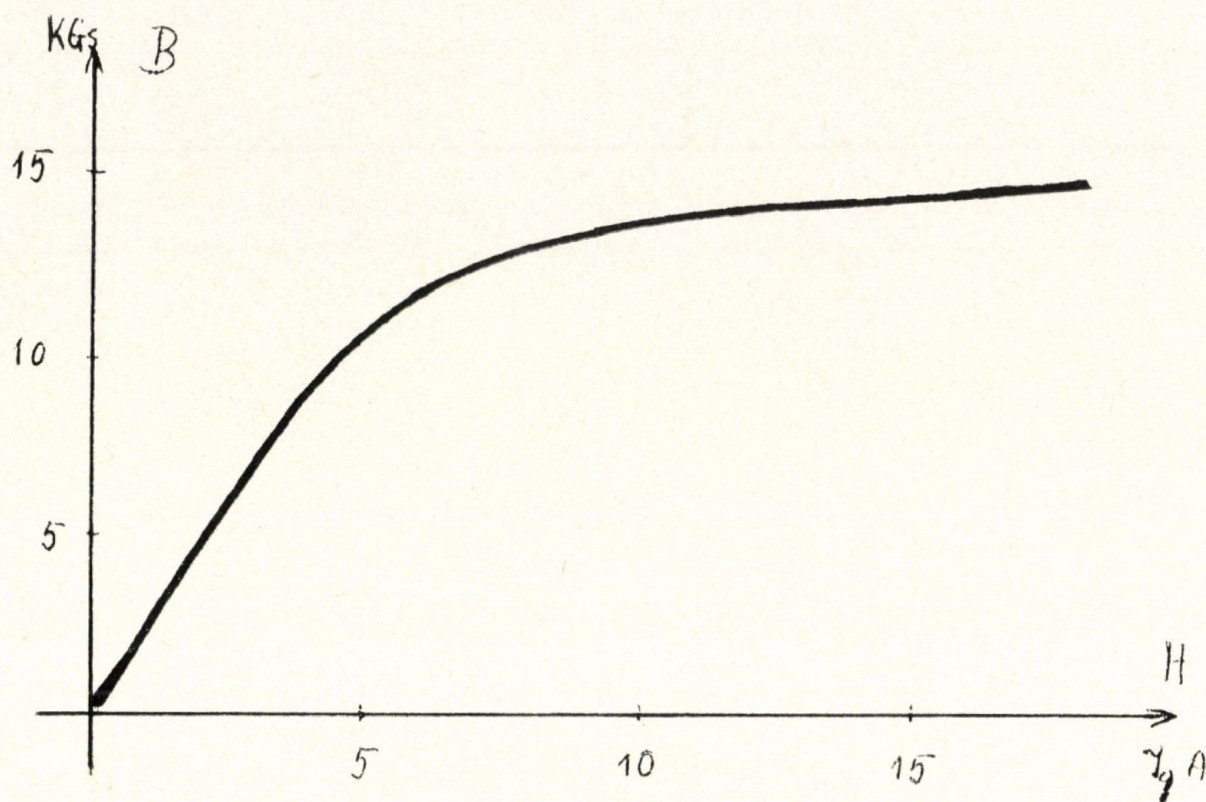
Az elektromágnessel szemben támasztott általános követelményként a következőket említhetjük meg:

A detektor teljes egészében elhelyezhető legyen a homogén mágneses fluxusban. A légrés olyan legyen, hogy a detektort akadálytalanul cserélhessük. A demonstrációhoz háromjarmú mágneskört alakítottunk ki, amelynek 10 mm légrésében 10—15 kGs indukciójú mágneses teret elő tudunk állítani (3. ábra). A vasmag anyaga 1 mm vastag Si—Fe transzformátorlemezekből áll. A két gerjesztőtekercset a transzformátoroknál alkalmazott szereléstől eltérően a két szélső jármon helyeztük el, mivel ezt



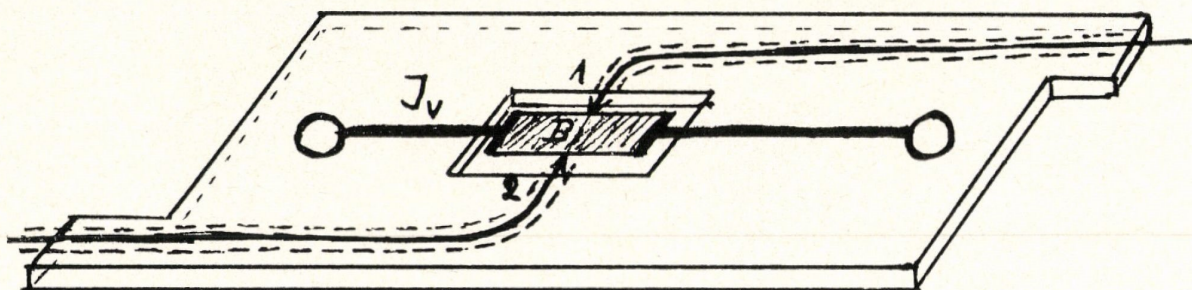
3. ábra: A Hall-generátor elektromágnesének vasmagja

az elektromágnezt más főiskolai demonstrációs kísérletekhez is használjuk. A 4. ábrán azt tüntettük fel, hogy az I_g gerjesztő áramerősség a mágneses légrésben milyen nagy B mágneses indukciót létesít. Ennek nagyságát Multiflex galvanométerrel mértük.

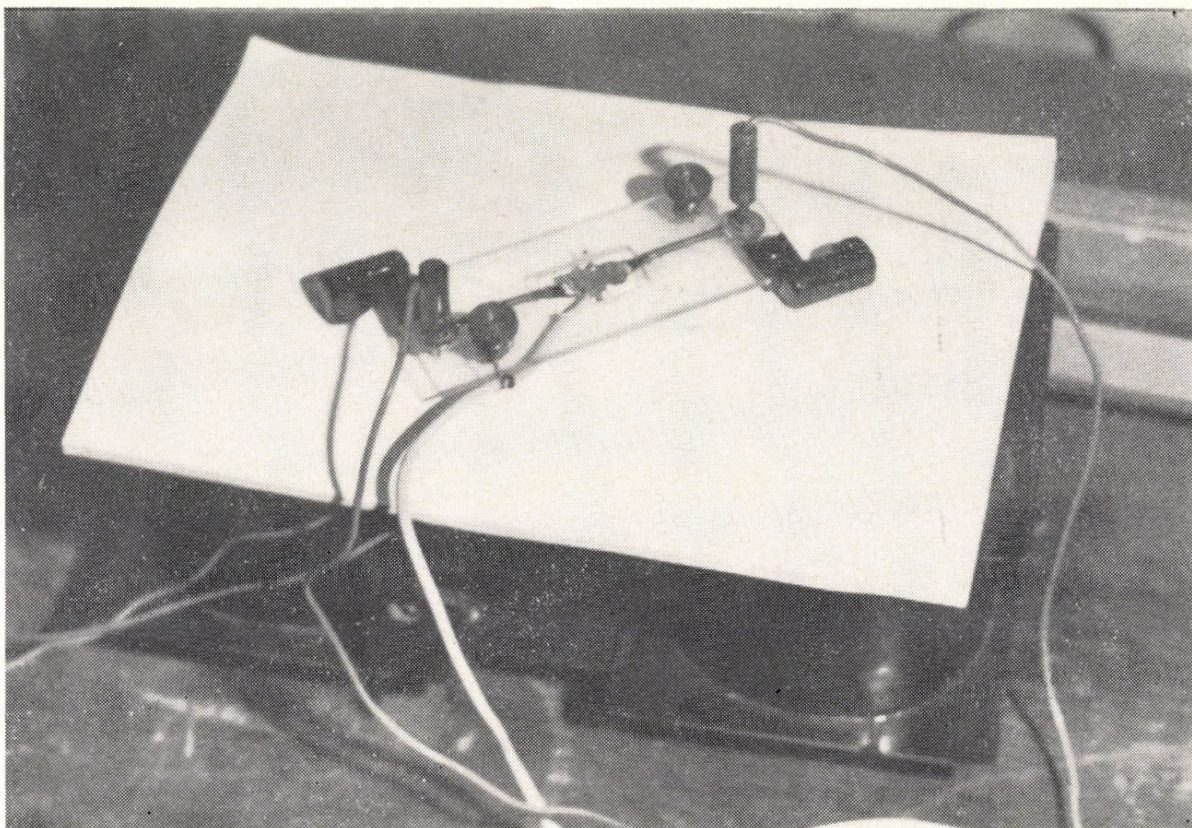


4. ábra: Az elektromágnes B, H jelleggörbéje

A bizmut az effektus demonstrálására anomálisan nagy R_H Hall-állandója miatt a legalkalmasabb anyag. A detektort tehát bizmutrúdból reszeléssel és marással, vagy öntéssel készítettük. A detektor érzékenysége függ a B irányába mutató detektor vastagságától (d), ezért igyekezzünk minél vékonyabb bizmutlapot készíteni. A bizmutszalagot az 5. a, b ábrákon látható módon plexilemezen rögzítettük. Az elektródák pontos rögzítését, villamos érintkezéseit nagy gonddal kell elkészíteni, mert az I_v vezérlőáram inhomogén térbeli eloszlása, az 1, 2 keresztirányú mágneses árnyékolású csatlakozások helytelen szerelése hibaforrás lehet.



5. a) ábra



5. a), b) ábra: a) A Hall-detektor rögzítése tartólemezen; b) (fénykép)

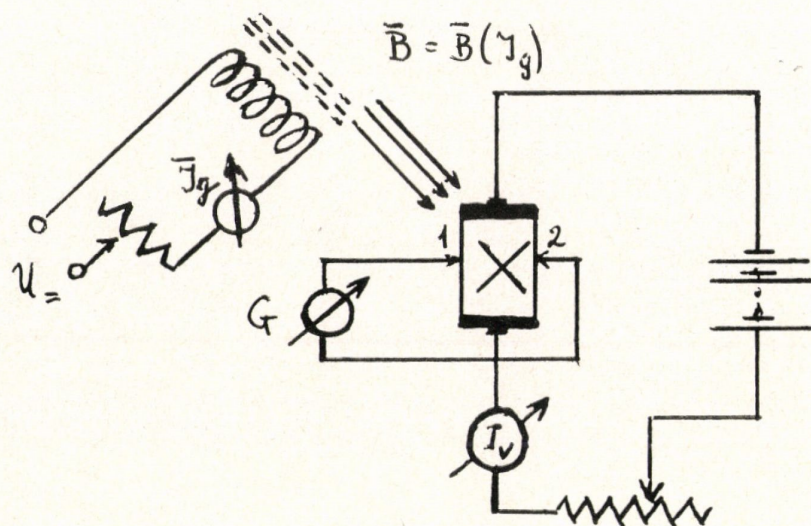
Az elektromágnes légrésbe helyezett Hall-detektoron az $I_V = 1$ A-tól 5 A-ig vezérlő egyenáramot egy 60 Ah-as NiFe-akkumulátorból, az elektromágnes gerjesztéséhez szükséges egyenáramot „Bomekó” áramforrásból nyertük. A jelenség demonstrálására egy 10^{-10} A/mm érzékenyséű Multiflex galvanométert használtunk. A Hall-effektus demonstrálását a 6., 7. ábra szemlélteti.

Az I_V vezérlőáram $\vec{B} = 0$ indukciónál jelentkező feszültségét parazita- vagy üresjárási feszültségnek nevezzük. Különböző kompenzációs kapcsolásokat alkalmazunk az üresjárási feszültség csökkentésére (8. ábra). A Hall-feszültség (\vec{U}_H) függvénye a (2) szerint az \vec{I}_g gerjesztőáramnak és az \vec{I}_V vezérlőáramnak. Tehát:

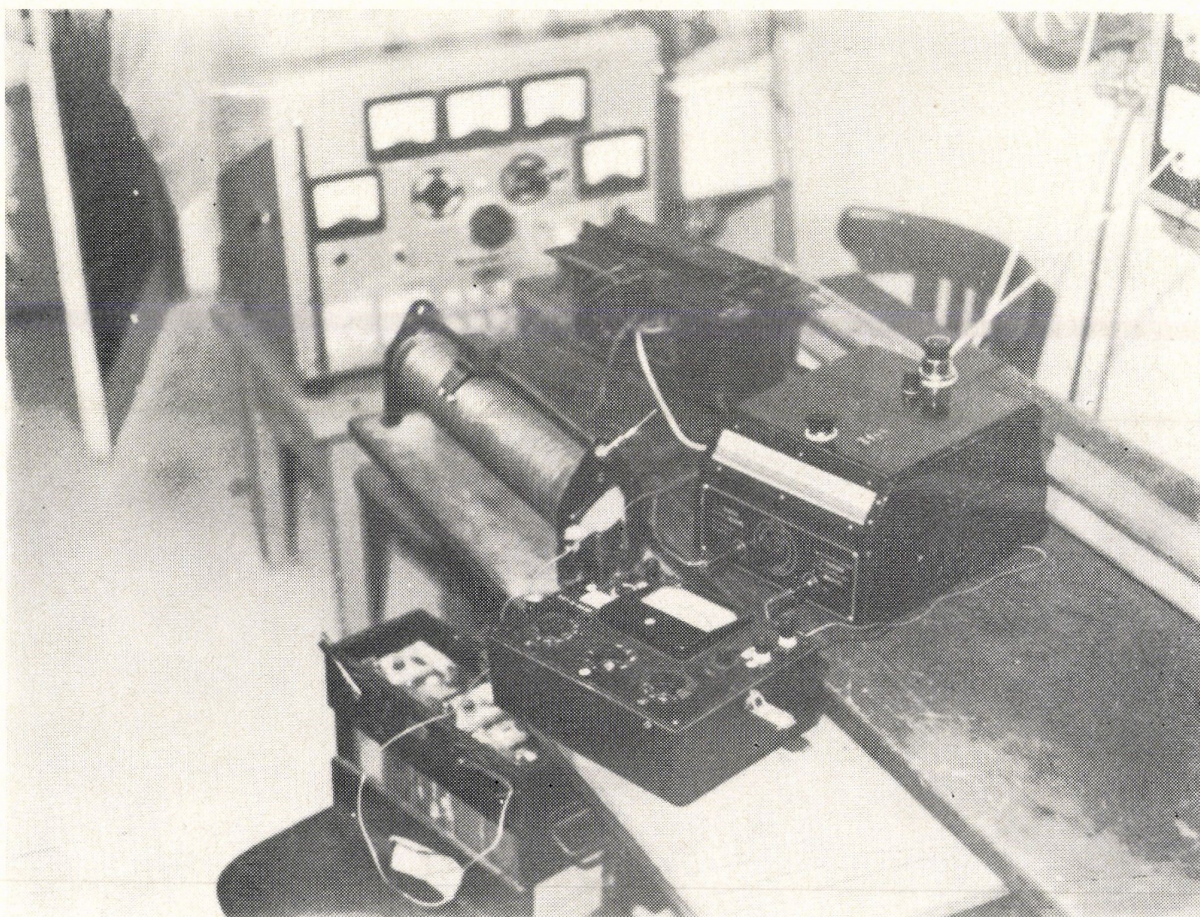
$$\vec{U}_H = \vec{U}_H(\vec{I}_g, \vec{I}_V). \quad (5)$$

Tanulságos a Hall-feszültség polaritásának vizsgálata. A demonstrációnál alkalmazható kapcsolásokat a következő vektorfüggvények adják:

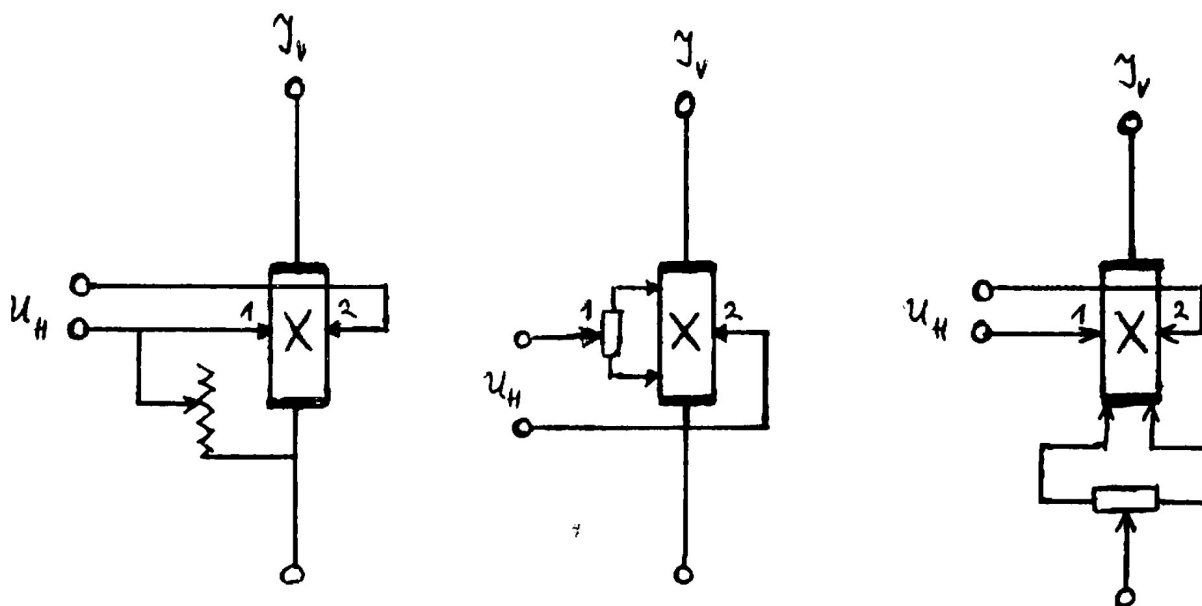
$$\begin{aligned} \vec{U}_H &= \vec{U}_H(\vec{I}_g, \vec{I}_V), \\ \vec{U}_H &= \vec{U}_H(\vec{I}_g, \vec{I}_V), \\ \vec{U}_H &= \vec{U}_H(\vec{I}_g, \vec{I}_V). \end{aligned} \quad (6)$$



6. ábra: A Hall-effektus demonstrálására alkalmas kapcsolás



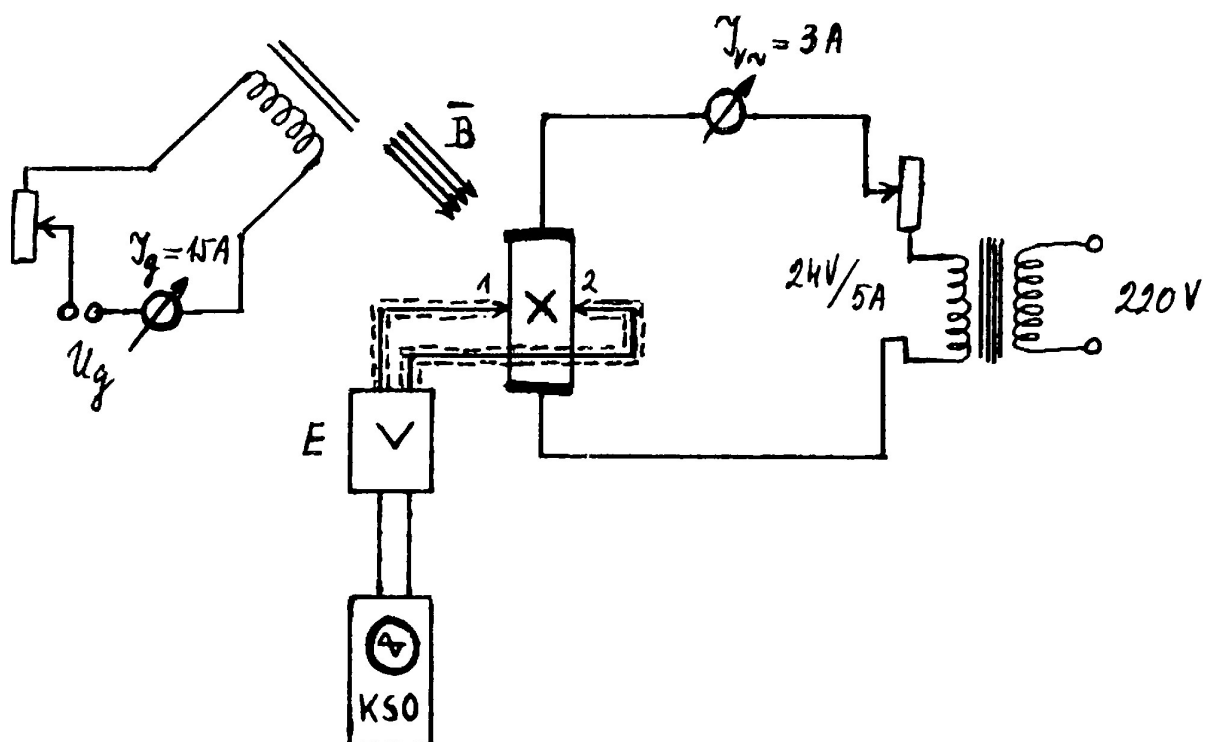
7. ábra: A Hall-effektus demonstrálása (fénykép)



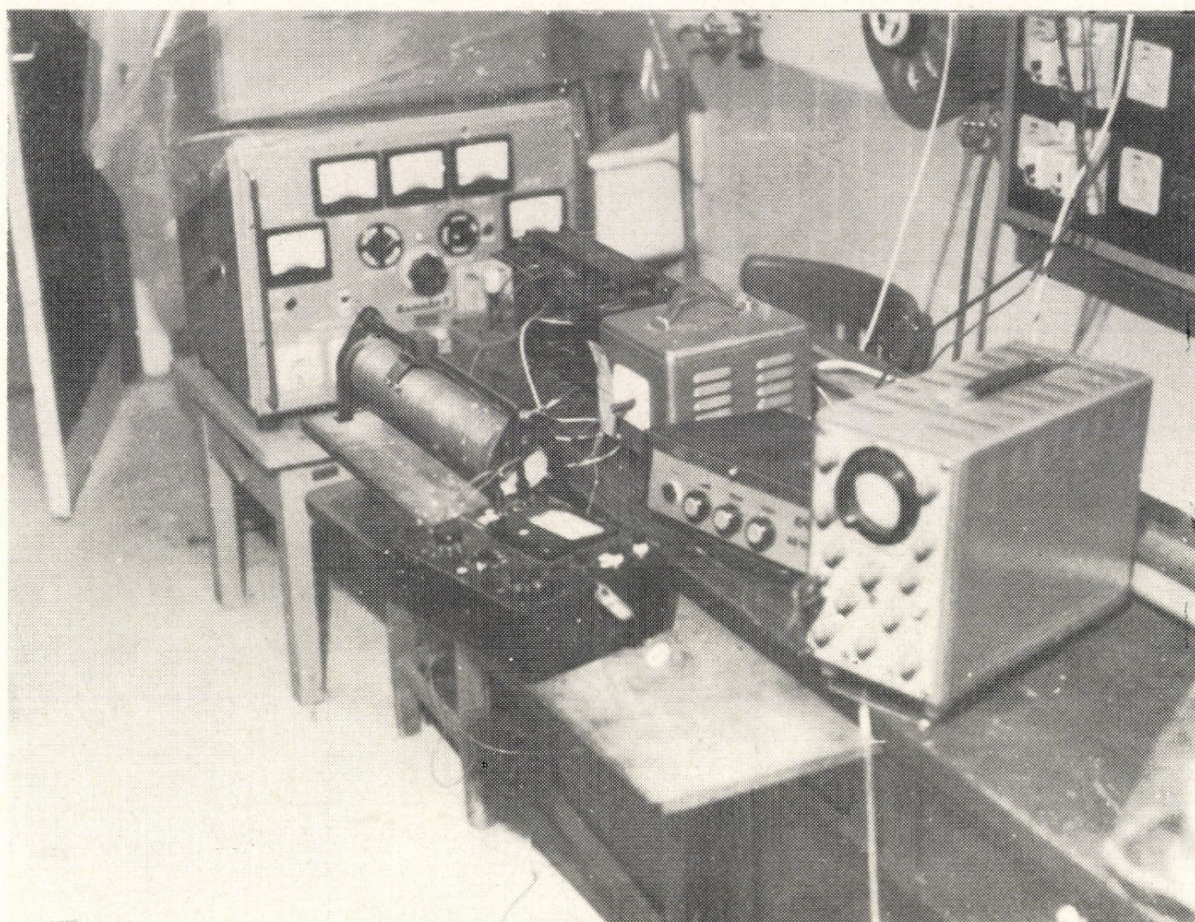
8. ábra: Kapcsolások parazitafeszültségek kompenzálására

A Hall-effektus amplitudó modulációjának demonstrálása

Az I_V vezérlőáram lehet váltakozóáram is. Ugyanis állandó indukció mellett az U_H Hall-feszültség minden időpillanatban arányos a váltakozó vezérlőárammal.



9. ábra: Váltakozóárammal vezérelt Hall-effektus



10. ábra: Amplitudó-moduláció demonstrációja (fénykép)

Az I_v vezérlőáramot 24 V-os 50 Hz-es reduktorból nyertük (9. 10. ábra). Az U_H váltakozó Hall-feszültséget mágneseesen árnyékolt vezetékkel az E váltakozóáramú erősítő (Typ.: AE 110/A.) 10 mV-os bemenő részéhez kapcsoltuk. A kísérleti összeállításnál minimálisra kell csökkenteni a parazitafeszültséget. Az erősítő kimenő jeleit a KSO katódsugároszcilloszkóp (Typ.: TR 4302) vertikális bemenetéhez csatoltuk. Az elektromágnes I_g gerjesztőáramának változtatásával a katódsugároszcilloszkóppal demontsrálható a Hall-effektus hálózati váltakozóáramú amplitudó-modulációja.

A Hall-effektus néhány gyakorlati alkalmazása

A Hall-generátorok üzemeltetésével kapcsolatos általános követelmények:

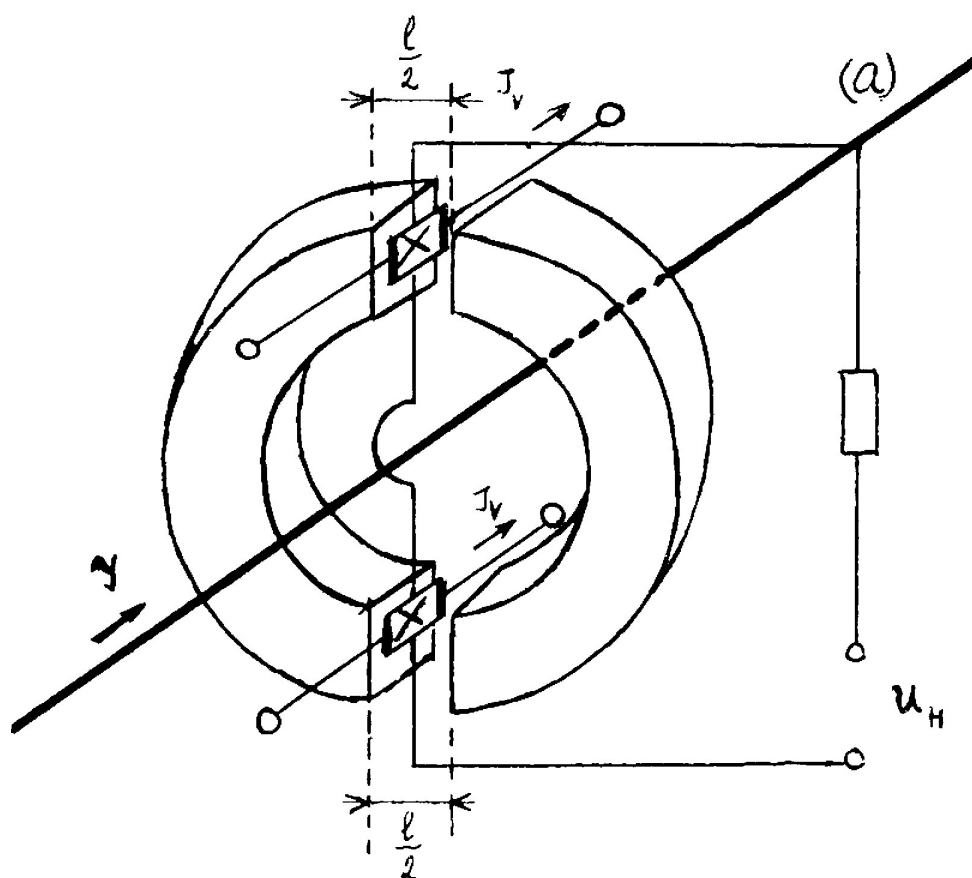
- A parazitafeszültség minimális, a generátor hőmérséklete állandó legyen;
- A Hall-állandó értéke maximálisan 5%-ot változzék.

1. Mágneses terek mérése

A Hall-generátor kimenő jele (U_H) arányos a mágneses indukcióval: $U_H = k \cdot I_v \cdot B$. Az U_H , k , I_v ismeretében kiszámolhatjuk a B értékét. Mágneses terek gradiensének mérése is megoldható speciális 1 mm^2 felületű detektorokkal. Gradiens-mérésnél egymástól d távolságra levő két Hall-generátort kell alkalmazni, amelyeknek az U_H feszültsége sorba van kapcsolva.

2. Nagy áramerősség mérése

10 kA-nél nagyobb áramok mérésére a Hall-effektus igen alkalmas. Ferromágneses anyagból készült mágneskörrel vesszük körül az árammal átjárt (a) vezetékét és a mágneskör légrésében helyezzük el a Hall-generátorokat (11. ábra). A gerjesztési törvényből következik:



11. ábra: Nagy áram mérése Hall-adóval

$$\oint H dl = (H_1 + H_2) \cdot l + \int_{l_v} H_v dl = I,$$

ahol: a $H_1 l_1 + H_2 l_2$ a légrésre eső mágneses feszültséget, az $\int_{l_v} H_v dl$ a ferromágneses anyagban létrejövő mágneses feszültséget jelenti.

De ha $\int_{l_v} H_v dl \ll (H_1 + H_2) \cdot l$, akkor $H_1 + H_2 = \frac{j}{l}$, vagy

$$B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 I}{l}. \quad (7)$$

A Hall-generátorok kimenő feszültségei $U_{H1} = k_1 \cdot I_{v1} \cdot B_1$ és $U_{H2} = k_2 \cdot I_{v2} \cdot B_2$, ahol $k_1 \cdot I_{v1}$ és $k_2 \cdot I_{v2}$ a Hall-generátorok feszültségérzékenysége. Ha biztosítható a $k_1 \cdot I_{v1} = k_2 \cdot I_{v2} = k I_v$ feltétel, akkor $U_H = U_{H1} + U_{H2} = k \cdot I_v \cdot (B_1 + B_2)$. A (7) egyenlet figyelembevételével $U_H = k \cdot I_v \cdot \frac{\mu_0 I}{l}$.

Amelyből:

$$I = \frac{U_H \cdot l}{k \cdot I_v \cdot \mu_0}, \quad (8)$$

ahol:

- I — a vezetékben folyó nagy áram;
- U_H — a két Hall-detektor feszültsége;
- l — a légrések hossza;
- μ_0 — vákuum permeabilitása.

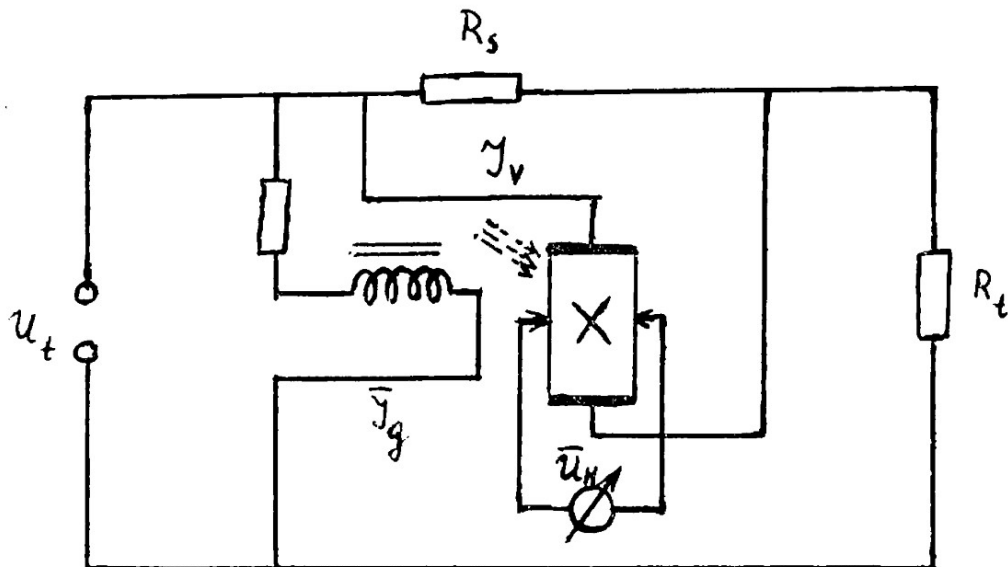
3. Egyenáramú teljesítmény mérése

A Hall-generátor vezérlőárama a gerjesztő áramkörben folyó árammal és az ebben az áramkörben fellépő feszültséggel, a Hall-feszültséggel arányos (12. ábra).

$$U_H = k \cdot c_1 \cdot U \cdot c_2 \cdot I_g = k' \cdot N.$$

Ebből:

$$N = \frac{U_H}{k'},$$



12. ábra: Egyenáramú teljesítmény mérésére alkalmas kapcsolás

ahol:

- c_1 — a generátor vezérlőárama (I_v) és gerjesztőárama (I_g) közötti arányossági tényező;
- c_2 — a vezérlő mágneses indukció és a terhelésen (gerjesztésen) megjelenő feszültség közötti arányossági tényező;
- k' — a Hall-generátor kimenőfeszültsége és a mérendő teljesítmény közötti arányossági tényező.

Hall-generátorral mérhetünk még meddő és látszólagos teljesítményt is [9]. 22. o., 43. o., 61. o.

Megemlítjük, hogy a Hall-generátorok a rádiótechnikában mind erősítők, rezgéskeltők [14], jelátalakítás területén mind egyenirányítók, modulátorok, automatikai áramkörökben mágneses mennyiségek összegezésére [6]. 191. o., villamos mennyiségek szorzására [11], hányadosának előállítására és a technika számos területén alkalmazhatók.

Megköszönöm C s e k ő Árpád címzetes egyetemi docens értékes tanácsait.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Blohincev: A kvantummechanika alapjai. Tankönyvkiadó, Bp. 1952.
- [2] Dobrecov: Atomfizika. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1964.
- [3] Finkelburg: Bevezetés az atomfizikába. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1953.
- [4] Grimshel: Lehrbuch de Physik. Band IV. BG, Teubner. Verlagsgesellschaft Leipzig, 1964.
- [5] Javorszkij—Detlaf: Fizikai zsebkönyv. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1974.
- [6] Kurth—Maaz: Messung höher Gleichströme mit Hall-Generatoren ETZ — A — 487. 14. 1956.
- [7] Lehmann, J. G.: Diódák és tranzisztorok. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1971.
- [8] Novobatzky—Neugebauer: Elektrodinamika és optika, 3. kiadás. Tankönyvkiadó, Bp. 1961.
- [9] Pinszker, A. P.—Bogomolov, V. N.: Hallotronok alkalmazása az automatikában. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1965.
- [10] Simonyi K.: Elektronfizika. Tankönyvkiadó, Bp. 1965.
- [11] Solymár L.—Walsch D.: Szilárdtestek elektromos tulajdonságai. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1972.
- [12] Strutt, M. J.—Sun, S. F.: Leistungsmessung und Regelung in mehrphasigen Ketten mittels Halbleitern 1956.
- [13] Schafer E.: Mágnes technika. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1972.
- [14] Weiss H.: Der Rückgekoppelte Hall-Generátor. 1956.